

## 平谱射电类星体在逆康普顿机制中软光子来源的研究\*

刘小鹏<sup>1</sup>, 王泽睿<sup>2</sup>, 杜雷鸣<sup>1</sup>, 谢照华<sup>1</sup>, 徐云冰<sup>1</sup>, 邓雪娇<sup>1</sup>, 李海凤<sup>1</sup>

(1. 云南师范大学物理与电子信息学院, 云南 昆明 650500 ; 2. 南京大学天体和空间中心, 江苏 南京 210093)

**摘要:** 为了验证逆康普顿机制中的主导过程, 以及主导过程中软光子的起源。我们通过文献收集了75个平谱射电类星体多波段的(准)同时性数据, 并利用对数抛物线函数拟合了频谱能量分布, 分析同步峰流量与逆康普顿峰之比和多普勒因子的关系, 运用自举法计算了样本的种子因子分布用以调查软光子的起源。分析结果如下: (1)、在轻子模型框架下, 整个样本与子样本 $\log(U_B(vF_\nu)_{EC}/U_{ext}(vF_\nu)_{syn})$ 与 $\log\delta$ 的显著相关性表明平谱射电类星体的高能辐射优先由外康普顿过程主导。(2)、对于相对低同步峰峰频的种群, 观测的种子因子分布与理论上尘埃环的种子因子范围相交表明其逆康普顿过程中的软光子很可能由尘埃环主导, 而对于相对高同步峰峰频的种群, 观测的种子因子超过了宽线区或尘埃环种子因子的范围, 因此我们还无法确定其软光子的来源。

**关键词:** 辐射机制; 活动星系核; 平谱射电类星体; 逆康普顿散射

**中图分类号:** P157.6      **文献标识码:**      **文章编号:**

## 0 引言

耀变体(Blazar)是观测者视线沿相对论性喷流轴向方向观测到的射电噪活动星系核<sup>[1]</sup>(Radio-Loud Active Galactic Nuclei)的一个子类, 包括可以观测到强发射线的平谱射电类星体(Flat-Spectrum Radio Quasar, FSRQ)和观测到弱或者无发射线的蝎虎天体(BL Lacerate, BL lac)两个子类<sup>[2]</sup>。观测上, 耀变体的宽波段辐射是从射电到伽马射线波段的光谱能量分布(Spectral Energy Distribution, SED), 在 $\log\nu - \log\nu F_\nu$ 图上呈现出典型的双峰结构。前人对这个双峰结构进行了大量的研究, 在目前应用最为广泛的轻子模型框架下, 低能峰被认为是相对论电子的同步辐射(Synchrotron Radiation, syn), 高能峰被认为是相对论电子与软光子作用而产生的逆康普顿散射<sup>[3]</sup>(Inverse Compton cattering, IC)。如果软光子来自同步辐射, 称为同步辐射自康普顿模型<sup>[4]</sup>(Synchrotron Self-Compton, SSC); 如果软光子来自喷流外部, 则称为外部康普顿模型(External Compton, EC)。在外康普顿模型的情况下, 其软光子可能来源于吸积盘<sup>[5]</sup>(Accretion Disc, AD), 宽线区<sup>[6]</sup>(Broad-Line Region, BLR)或尘埃环<sup>[7]</sup>(Dust Torus, DT)。到目前为止, 逆康普顿散射的软光子来源仍然无法完全确定下来<sup>[8]</sup>。

\* 基金项目: 国家自然科学基金天文联合基金(U1431123, 10973034)资助。

收稿日期: 2021-01-18; 修订日期:

作者简介: 刘小鹏, 男, 硕士. 研究方向: 天体物理. Email: boyliuxiaopeng@foxmail.com

通讯简介: 谢照华, 男, 教授. 研究方向: 理论物理和天体物理. Email: zhxie007@126.com

一些研究者认为耀变体的短时标光变现象意味着其辐射产生位置在 BLR 以内<sup>[9-10]</sup>。在标准的单区轻子模型框架下,无法解释 FSRQ 源 3C 279<sup>[11]</sup>,3C 454.3<sup>[12]</sup>以及 4C 21.35<sup>[13]</sup>观测到的甚高能伽马辐射 ( $\geq 100\text{GeV}$ ) 现象。利用甚长基线干涉技术<sup>[14]</sup> (Very-Long Baseline Interferometry, VLBI) 对射电辐射进行观测,研究者们发现在射电波段有一些明亮的区域,这些区域被称为射电核,其位置远离中心黑洞,甚至在 DT 之外<sup>[15]</sup>。文[16]Tan 收集了 60 个有多波段准同时性数据的 FSRQs,在单区模型框架下,IC 机制中同时考虑了 BLR 和 DT 贡献的种子光子,他们发现 FSRQs 的高能辐射来源于 BLR 之外 DT 之内。文[17]Harvey 收集了 62 个有多波段准同时性数据的 FSRQs,在轻子模型的框架下,引入一个参量,基于观测到的多波段 SEDs 去计算双峰结构的峰频率和通量,来确定 blazar 中 IC 机制下 EC 过程中主要的软光子场。他们把这个参量称为种子因子 (Seed Factor, SF)。结合运用自举法 (Bootstrapping) 发现观测的种子因子与期望上来自 DT 的种子因子在统计上显著一致,与期望上的 BLR 不一致。他们研究结果表明 IC 机制中的软光子场主要由 DT 贡献。

综上所述,目前仍然无法确定 IC 辐射的软光子起源,也无法确定辐射产生的位置。在本文中,我们使用包含同时性的大样本从统计视角分析 IC 机制中软光子的起源。

## 1 样本

本文从 *Feimi* 4-LAC 活动星系核目录收集了 69 个有多波段准同时性数据的平谱射电类星体<sup>[18]</sup>,另外在文献[19]中收集了 6 个有多波段准同时性数据的平谱射电类星体样本,共 75 个平谱射电类星体。我们收集的样本都满足下列条件:有确定的红移;不考虑射电波段的数据,覆盖紫外到伽马射线波段,各个波段相交的观测时间小于 2 个月,可以构建双峰结构的 SEDs;有可以查到的体洛伦兹因子<sup>[20]</sup>或多普勒因子<sup>[19]</sup>。在本文中,我们假设体洛伦兹因子与多普勒因子近似相等<sup>[21]</sup>,使用的磁场 ( $B$ ) 参数由文[16]中的模型拟合得到。我们的样本有一个相对高峰值频率的源 (PKS 2141+175,  $\log v_{\text{syn}} = 15.08 \text{ Hz}$ )。

分别使用 ASDC SED Builder<sup>①</sup>拟合来自 *Feimi* 样本的 SEDs<sup>[22]</sup>,Python 拟合提取自文[19]的数据构成的 SEDs。我们用二次函数分别拟合耀变体 SED 的低能峰和高能峰,二次函数表达式为<sup>[23]</sup>:

$$\log(vF\nu) = c(\log\nu)^2 + b(\log\nu) + a \quad (1)$$

其中,  $a$ 、 $b$  和  $c$  为常数。我们通过拟合观测数据得到的峰值频率和整个峰的积分光度都是在观测者坐标系下的,为了去除红移的影响,我们需要将这两个量转到 AGN 静止参考系,转换公式如下:

$$\nu_{\text{syn,IC}} = (1+z)\nu_{\text{syn,IC}}^{\text{obs}} \quad (2)$$

$$(\nu L_\nu)_{\text{syn,IC}} = 4\pi D_L^2 (\nu F_\nu)_{\text{syn,IC}} \quad (3)$$

式 (2) 中,  $\nu_{\text{syn,IC}}^{\text{obs}}$  是观测坐标系下的同步峰或逆康普顿峰峰值峰频,  $z$  为红移。式 (3) 中,

<sup>①</sup> <https://tools.ssdc.asi.it/index.jsp>

$D_L$  为光度距离,  $(\nu F_\nu)_{\text{syn,IC}}$  是观测者坐标系下的同步峰或逆康普顿峰的积分流量。

表 1 中展示了我们收集的 75 个样本, 第 (1) 栏, 源的名称; 第 (2) 栏, 红移; 第 (3) 栏, (准) 同时性时间 (文[19]中的数据未注明时间); 第 (4) 栏, 取对数后的同步峰峰值频率 (以 Hz 为单位); 第 (5) 栏, 取对数后的同步峰流量 (以  $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  为单位); 第 (6) 栏, 取对数后的同步峰光度 (以  $\text{erg s}^{-1}$  为单位)。第 (7) 栏, 取对数后的 IC 峰峰值频率 (以 Hz 为单位); 第 (8) 栏, 取对数后的逆康普顿峰流量 (以  $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  为单位); 第 (9) 栏, 取对数的逆康普顿峰光度 (以  $\text{erg s}^{-1}$  为单位); 第 (10) 栏, 磁场能量密度 (以  $\text{erg s}^{-3}$  为单位); 第 (11) 栏, 体洛伦兹因子 (多普勒因子以上角标 a 注明); 第 (12) 栏, 观测的种子因子。

表 1 样本  
Table.1 The sample

Source name	Z	Time	$\log \nu_{\text{syn}}$	$\log(\nu F_\nu)_{\text{syn}}$	$\log(\nu L_\nu)_{\text{syn}}$	$\log \nu_{\text{IC}}$	$\log(\nu F_\nu)_{\text{IC}}$	$\log(\nu L_\nu)_{\text{IC}}$	$U_B$	$\Gamma$	SF
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
PKS 0537-286	3.104	2010/3/7-12	12.10	-11.471	47.453	20.472	-9.541	49.383	0.05218	12.73	5.599
4C +04.42	0.966	2010-6-17	12.41	-10.738	46.943	21.749	-9.860	47.821	0.05361	12.11	4.020
TXS 0653-033	0.634	2010-3-31	12.58	-10.991	47.350	22.854	-10.201	47.009	0.07689	22.49	3.119
PKS 0605-085	0.872	2010-6-7	12.62	-10.914	46.635	22.989	-10.383	47.167	0.10023	14.94	2.904
3C 279	0.536	2010-1-15	12.62	-9.764	48.565	22.141	-9.173	47.861	0.01743	12.82	3.694
PKS 2325+093	1.841	2010/6/18-29	12.64	-11.133	47.219	21.546	-9.780	48.572	0.17865	26.84	4.710
PKS 0215+015	1.715	2010/1/29-2010/2/2	12.67	-10.419	47.878	21.895	-9.947	48.350	0.13171	25.67	3.908
PKS B1921-293	0.353	2010-9-30	12.73	-9.742	50.088	21.151	-9.764	46.840	0.03922	11.33	4.467
S5 1357+76	1.585	2010/5/24-2010/5/25	12.73	-11.318	48.842	22.267	-10.556	47.635	0.08655	14.34	3.763
PKS 1244-255	0.635	2010-6-25	12.74	-10.472	46.761	22.164	-9.462	47.771	0.03841	10.7	4.007
PKS 1730-13	0.902	2010-3-14	12.75	-10.218	47.389	22.946	-9.190	48.418	0.02501	13.78	3.261
3C 446	1.404	2010/5/22-27	12.75	-10.383	47.678	21.818	-10.028	48.033	0.04872	12.00	4.048
3C 454.3	0.859	2009/12/4-6	12.76	-9.234	48.299	22.029	-8.210	49.324	0.19190	16.95	4.173
3C 273	0.158	2010/6/7-23	12.76	-9.478	46.334	20.247	-8.575	47.239	0.04930	20.87	5.947
S3 0827+24	0.942	2010/4/18-19	12.77	-10.595	47.512	20.788	-11.064	46.569	0.09886	13.71	4.668
NRAO 512	1.66	2010-8-7	12.78	-10.879	47.383	22.800	-9.947	48.315	0.07356	14.87	3.370
B2 0743+25	2.979	2010-10-15	12.78	-11.595	47.451	21.697	-10.192	48.668	0.04276	13.48	4.722
TXS 0800+618	3.033	2010/4/3-4	12.79	-11.479	47.400	21.626	-10.339	48.539	0.48790	15.11	4.691
PKS 0454-234	1.003	2010/2/24-25	12.80	-10.417	47.304	22.122	-10.093	47.628	0.03834	8.66	3.764
4C 38.41	1.814	2010-3-7	12.82	-10.377	49.673	22.082	-9.194	49.142	0.06195	15.33	4.302
4C+47.44	0.735	2010/7/30-2010/8/1	12.85	-10.764	47.411	21.808	-10.093	47.274	0.03971	9.64	4.280
OP 313	0.997	2009/12/12-21	12.86	-10.530	47.163	22.323	-9.900	47.795	0.19773	31.22	3.795
OK 290	0.707	2010/5/7-2010/6/15	12.88	-10.721	47.734	21.545	-10.228	47.098	0.12912	14.44	4.497
B2 1324+22	1.4	2010-3-30	12.88	-10.959	47.100	21.911	-10.080	47.978	0.06439	12.06	4.346
PKS 2209+236	1.125	2009/4/15-21	12.92	-10.886	46.937	23.142	-10.488	47.335	0.01172	9.30	2.817
OJ535	1.418	2010/3/28-2010/4/8	12.93	-11.219	46.853	21.506	-10.357	47.715	0.05034	12.16	4.793
PKS 1335-127	0.539	2010/1/18-26	12.94	-10.237	47.553	21.367	-10.035	47.004	0.12695	22.62	4.567

chinaXiv:202102.00005v1

chinaXiv:202102.00005v1

TXS 2331+073	0.401	2009/12/20-21	12.94	-10.839	45.895	21.569	-10.425	46.308	0.34759	19.93	4.478
OI 280	0.889	210/4/1-12	12.95	-10.419	47.152	21.254	-10.270	47.300	0.05199	16.18	4.669
B3 0908+41	2.563	2010-2-25	12.97	-11.400	47.302	22.629	-10.851	47.853	0.13743	18.82	3.464
PKS 1144-379	1.048	2010-6-24	12.97	-10.544	48.150	22.050	-10.242	47.505	0.18700	20.18	3.948
S4 0917+44	2.19	2009/10/28-30	12.97	-10.710	47.825	22.214	-9.701	48.835	0.03139	12.08	4.179
OG 505	1.254	2010-4-25	12.98	-10.839	47.103	22.184	-9.870	48.071	0.02833	14.77	4.223
TXS 0404+075	1.133	2010/2/14-15	12.99	-11.052	46.779	21.935	-10.437	47.395	0.13658	19.47	4.274
PKS 1954-388	0.63	2010/4/9-14	13.02	-10.456	50.226	21.636	-9.857	47.348	0.04035	14.94	4.621
PKS 1546+027	0.414	2010/2/13-2010/2/20	13.04	-10.520	49.534	21.411	-10.021	46.744	0.29477	21.52	4.811
BZQ J1514+4450	0.57	2010-4-6	13.05	-11.043	49.257	22.111	-10.559	46.540	0.03243	8.30	4.069
B2 2319+31	1.489	2009-5-20	13.05	-11.434	46.691	22.734	-10.361	47.764	0.05423	22.10	3.771
PMN J2135-5006	2.181	2010/4/22-/2010/5/5	13.05	-11.854	50.503	22.307	-10.431	48.101	0.10296	13.78	4.409
PKS B1434+235	1.548	2010-6-14	13.06	-11.214	48.980	22.435	-10.684	47.483	0.09691	17.16	3.819
PKS 2345-16	0.576	2009/12/4-5	13.07	-10.460	47.533	22.030	-10.172	46.937	0.04487	17.42	4.084
PKS 0436-129	1.285	2010-7-1	13.07	-11.217	46.750	22.341	-10.590	47.376	0.04533	6.30	3.952
B3 0650+453	0.928	2010/3/22-24	13.13	-10.971	46.645	22.291	-10.079	47.538	0.11962	17.76	4.207
PKS 2255-282	0.926	2010/5/20-26	13.14	-10.285	47.329	21.771	-9.780	47.835	0.09318	16.34	4.573
PKS 0541-834	0.774	2009/11/8-11	13.17	-11.438	45.985	22.193	-10.315	47.106	0.01701	11.20	4.464
B2 2155+31	1.488	2009/7/8-12	13.23	-11.160	46.964	22.462	-10.132	47.992	0.17109	10.92	4.222
B2 1520+31	1.487	-	13.26	-13.330	44.814	22.339	-11.304	46.841	0.04295	22.62	4.942
4C +28.07	1.213	2010-2-5	13.29	-10.287	47.492	21.862	-9.561	48.343	0.13513	16.57	4.779
PKS 1406-076	1.494	2010-5-23	13.29	-10.796	47.329	22.239	-10.127	48.001	0.01978	10.82	4.319
PKS 2155-83	1.865	2010/7/5-17	13.31	-11.128	47.238	22.107	-9.971	48.396	0.02421	10.70	4.763
PKS 1502+106	1.839	2010-7-29	13.33	-10.721	49.119	22.810	-9.156	49.195	0.00408	25.09	4.290
B2 1846+32A	0.798	2010/10/6-19	13.35	-10.695	49.949	21.509	-9.987	47.466	0.06763	12.86	5.116
B3 1708+433	1.027	2009/12/1-2	13.39	-10.971	49.811	22.131	-9.971	47.756	0.04488	11.30	4.682
PMN 2345-1555	0.621	2010/4/1-30	13.40	-10.583	47.390	22.707	-10.029	47.160	0.33164	25.46	3.892
PMN J1959-4246	2.178	2010/4/5-14	13.41	-11.076	50.365	22.173	-10.082	48.447	0.12192	17.16	4.674
PKS 0420-01	0.916	2009-8-27	13.41	-9.762	47.840	22.218	-9.625	47.978	0.05968	12.43	4.209
PKS 1203-26	0.789	2010/11/1-2010/12/31	13.43	-10.932	48.288	21.246	-10.346	47.097	0.04521	12.40	5.437
PKS 0906+01	1.024	2010/4/18-2010/5/5	13.44	-10.556	47.167	21.426	-9.535	48.187	0.19362	15.32	5.503
PKS 1510-089	0.36	-	13.45	-12.256	44.388	22.138	-11.077	45.567	0.07864	12.08	4.884
MG2 J110606+2812	0.843	2010/2/07-2010/3/07	13.46	-10.842	48.011	21.994	-10.358	47.156	0.05902	17.42	4.652
4C+29.45	0.724	2010/5/28-2010/6/11	13.49	-10.337	47.014	22.319	-9.721	47.630	0.05231	25.90	4.433
MG2 J071354+1934	0.54	2009/12/15-17	13.51	-10.613	47.472	22.323	-10.061	46.980	0.15308	15.76	4.400
PMN J2145-3357	1.361	2009/9/22-24	13.52	-10.991	50.642	23.086	-10.378	47.650	0.00067	14.43	3.641
PKS 0601-70	2.409	2008/12/1-30	13.58	-10.924	47.714	22.717	-10.143	48.494	0.00129	33.06 <sup>a</sup>	4.195
OC 457	0.859	-	13.60	-11.726	45.829	22.652	-11.588	45.967	0.00032	21.45 <sup>a</sup>	3.916
PKS B1035-281	1.066	2010/1/22-23	13.62	-11.118	47.873	21.974	-10.287	47.478	0.00312	20.63	5.047
PKS 0347-211	2.944	-	13.66	-12.267	46.602	22.296	-11.358	47.511	0.00025	25.82	4.813
CRATES J1208+5441	1.344	2010/5/16-21	13.71	-11.183	48.427	21.819	-10.014	48.001	0.00032	8.80	5.465
PMN J1347-3750	1.3	2010-9-20	13.77	-11.123	48.703	21.840	-10.236	47.743	0.00431	24.00	5.337
MG2 J153938+2744	2.191	2010-3-17	13.77	-11.383	49.396	23.871	-10.695	47.841	0.00025	12.11	3.114
CLASS J1333+5057	1.362	2010/3/12-17	13.79	-11.699	47.370	22.375	-10.526	47.502	0.00053	23.00	4.974

4C+55.17	0.896	2009/10/31-2009/11/2	13.82	-10.658	47.431	24.289	-9.682	47.897	0.00175	14.94	2.945
GB6 J0654+5042	1.253	2010-1-15	14.01	-10.910	47.030	23.221	-10.354	47.586	0.00141	14.77	3.965
PKS 1454-354	1.424	-	14.11	-12.441	45.656	22.441	-11.153	46.945	0.00299	16.00	5.290
PKS 2141+175	0.213	-	15.08	-11.710	44.412	23.918	-11.580	44.542	0.00308	10.00	4.114

## 2 结果与分析

### 2.1 同步与逆康普峰的流量比和多普勒因子

文[24]使用均匀的单区轻子模型进行分析，他们假设了电子是以截断幂律谱的形式注入到相对论性运动的等离子体团中，注入电子会随着时间演化。多波段的辐射全部来自这个以相对论性速度运动的致密辐射区。他们通过研究发现，如果 IC 过程是由 EC 过程占主导，则 EC 过程贡献的流量和同步峰流量的关系近似如下<sup>[24]</sup>，

$$\frac{U_B(\nu F_\nu)_{EC}}{U_{ext}(\nu F_\nu)_{syn}} \approx \delta^{1+\alpha} \quad (4)$$

其中， $U_B = B^2/8\pi$ 是磁场能量密度， $U_{ext}$ 是外部光子的能量密度， $\delta$ 是多普勒因子， $\alpha$ 是光子谱指数， $B$  是磁场。假设 $U_{ext}$ 是恒定的<sup>[17]</sup>，常数通常会离散数据，并不会影响相关性的分析。因此，(2) 式可以预测 IC 峰流量与同步峰流量的比值和多普勒因子之间的相关性。如果 IC 过程是由 SSC 过程主导，那么 SSC 过程产生辐射的流量和同步辐射的流量之比，可以写成<sup>[24]</sup>：

$$\frac{(\nu F_\nu)_{SSC}}{(\nu F_\nu)_{syn}} \approx \frac{2}{3} (\sigma_T n_{eo} r_b) \left( \frac{\epsilon_s}{\epsilon_c} \right)^{(\alpha-1)} \ln \bar{\Sigma}_C(\epsilon_c) \propto n_{eo} \quad (5)$$

其中， $\sigma_T$ 是汤姆森散射截面， $n_{eo}$ 是非热辐射电子数密度的归一化因子， $r_b$ 是辐射区的半径， $\epsilon_s$ 是同步峰分量定义的上限， $\epsilon_c$ 是高能康普顿分量定义范围的上限， $\bar{\Sigma}_C$ 是转换后康普顿-同步的对数形式。此时，我们预期 IC 峰流量与同步峰流量的比值和多普勒因子之间没有相关性。

图 1 中展示了整个样本 $\log(U_B(\nu F_\nu)_{EC}/U_{ext}(\nu F_\nu)_{syn})$ 与 $\log\delta$ 的相关性。斯皮尔曼测试显示置信水平  $p=0.0003$ （阈值 $p = 0.05$ ）以及相关系数  $R=0.470$ 。我们用最小二乘法做线性回归得到的结果为 $\log(U_B(\nu F_\nu)_{EC}/U_{ext}(\nu F_\nu)_{syn}) = (2.40 \pm 0.36)\log\delta + (-4.76 \pm 0.43)$ 。上述结果表明，FSRQs 中 IC 机制主要由 EC 过程主导。

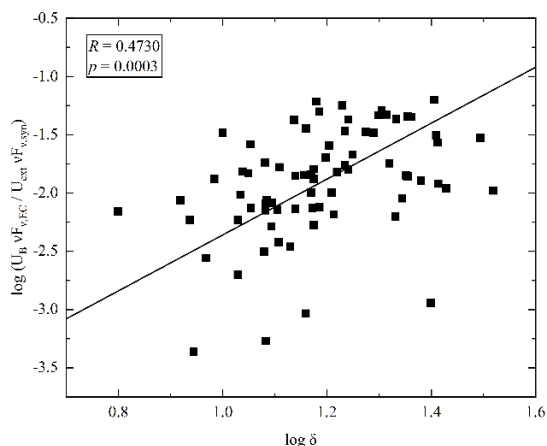


图 1 整个样本 $\log(U_B(vF_v)_{EC}/U_{ext}(vF_v)_{syn})$ 与 $\log\delta$ 的相关性分析, 实线表示最佳拟合。

Fig.1 The correlation for the whole sample between  $\log(U_B(vF_v)_{EC}/U_{ext}(vF_v)_{syn})$  and  $\log\delta$ . The solid line is the best linear fitting.

根据文[25]的说法, 同步峰峰值频率可能跟粒子能被加速到达的最大能量有关。对于目前更为常见的 LSP/ISP/HSP 分类法<sup>[26]</sup>, 他们发现统计上 FSRQs 大部分属于 LSPs, 并且同步峰峰值频率集中在 $\log v_{syn} \approx 13.3\text{Hz}$ , 还有逆康普顿散射发生在汤姆逊区域 (The Thomson regime)。所以在本文中, 我们想要确定是否我们样本中不同峰频的 FSRQ 也有一些物理上的不同, 因此我们按照同步峰峰值频率集中在 $\sim 13.3\text{Hz}$ 把我们的样本分成了两个子样本, 即相对低同步峰峰频种群 ( $12.10\text{Hz} < \log v_{syn} < 13.05\text{Hz}$ , 包含 38 个源, 称低峰频种群) 与相对高同步峰峰频种群 ( $13.05\text{Hz} < \log v_{syn} < 14.11\text{Hz}$ , 包含 37 个源, 称高峰频种群)。图 2 中分别展示了两个种群  $\log(U_B(vF_v)_{EC}/U_{ext}(vF_v)_{syn})$  与  $\log\delta$  的相关性。低峰频的种群, 斯皮尔曼测试显示置信水平  $p=0.013$  以及相关系数  $R=0.520$ 。我们用最小二乘法做线性回归得到的结果为  $\log(U_B(vF_v)_{EC}/U_{ext}(vF_v)_{syn}) = (2.13 \pm 0.45)\log\delta + (-4.48 \pm 0.55)$ 。高峰频的种群, 斯皮尔曼测试显示置信水平  $p=0.008$  以及相关系数  $R=0.433$ 。我们用最小二乘法做线性回归得到的结果为  $\log(U_B(vF_v)_{EC}/U_{ext}(vF_v)_{syn}) = (2.72 \pm 0.58)\log\delta + (-5.09 \pm 0.69)$ 。上述分析结果表明, 在分成两个子样本进行研究得到的结果与整个样本的结果没有明显差异, 表明在 FSRQs 样本中, IC 机制主要由 EC 过程主导。

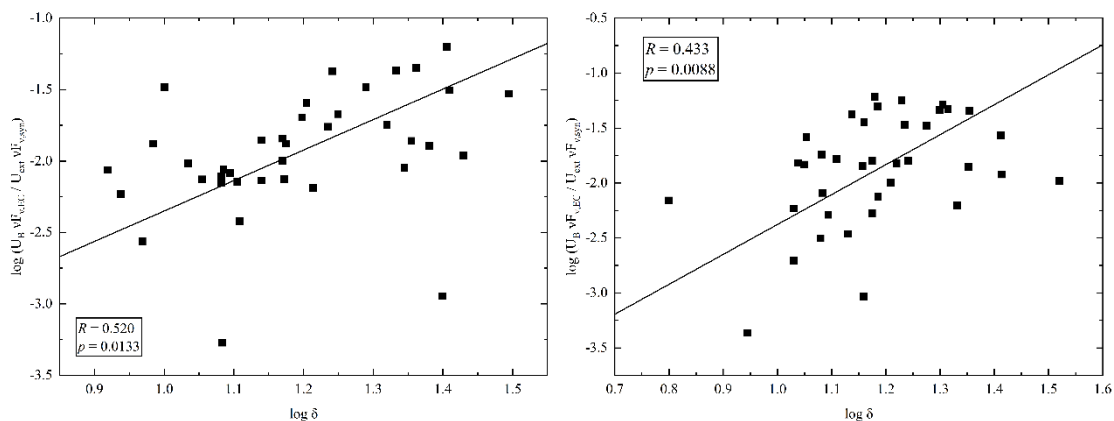


图 2 两个种群 $\log(U_B(vF_v)_{EC}/U_{ext}(vF_v)_{syn})$ 与 $\log\delta$ 的相关性分析。左图为低峰频种群 ( $12.10\text{ Hz} < \log v_{syn} < 13.05\text{ Hz}$ ) 包含 38 个



源，右图为高峰种群 ( $12.10 \text{ Hz} < \log v_{\text{syn}} < 13.05 \text{ Hz}$ ) 包含 37 个源。实线表示最佳拟合。

Fig.2 The correlation for two populations between  $\log(U_{\text{B}}(vF_{\nu})_{\text{EC}}/U_{\text{ext}}(vF_{\nu})_{\text{syn}})$  and  $\log \delta$ . The left panel is the low frequency peak populations ( $12.10 \text{ Hz} < \log v_{\text{syn}} < 13.05 \text{ Hz}$ ) containing 38 sources, and the right panel is the high frequency peak populations ( $13.05 \text{ Hz} < \log v_{\text{syn}} < 14.11 \text{ Hz}$ ) containing of 37 sources. The solid line is the best linear fitting.

## 2.2 种子因子

在上一节的研究中，我们发现 FSRQs 的 IC 辐射都是由 EC 过程主导的，在 EC 过程中存在多种软光子起源，例如吸积盘 (accretion disk, AD)，宽线区 (broad-line region, BLR) 和尘埃环 (dust torus, DT) 等。为了进一步调查其软光子的来源。我们使用文[17]Harvey 提出的自举法 (bootstrapping) 去计算低、高峰频种群的观测的种子因子分布 (seed factor distribution) (数值见表 1)。计算种子因子的表达式为<sup>[17]</sup>:

$$\text{SF} = \log_{10} \left( \frac{U_{\text{ext}}^{1/2}}{\epsilon_0} \right) = \log_{10} \left( 3.22 \times 10^4 \frac{CD^{1/2} v_{\text{syn},13}}{v_{\text{IC},22}} \right) \text{ Gauss}, \quad (6)$$

其中， $U_{\text{ext}}$  是喷流外部光子能量密度 (在 CGS 制下)； $\epsilon_0$  是外部光子的特征能量 (以静止电子的能量为单位)； $CD$  是康普顿主导 ( $CD = (vLv)_{\text{IC,peak}}/(vLv)_{\text{syn,peak}}$ ，即 IC 峰的峰值光度与同步峰的峰值光度的比值，以 10 为单位)； $v_{\text{syn},13}$  是同步峰的峰值频率 (以  $10^{13}$  为单位)； $v_{\text{IC},22}$  是 IC 峰的峰值频率 (以  $10^{22}$  为单位)。BLR 和 DT 理论上期望的种子因子分布，是通过 (6) 式的外部光子场及外部光子特征能量进行估算的。我们采用 Harvey 给出的范围，即： $\text{SF}_{\text{BLR}} = 3.29 \pm 0.11$ ； $\text{SF}_{\text{DT}} = 3.92 \pm 0.11$ 。

我们使用双侧柯尔莫戈洛夫检验 (two-sided Kolmogorov-Smirnov test) 对各个样本的种子因子分布进行了正态性检验。我们发现在低、高峰频种群中均不能拒绝正态性假设。在低峰频种群中，拒绝正态性假设的显著性为  $0.37\sigma$  ( $p=0.71$ )；而在高峰频种群，拒绝正态性假设的显著性为  $0.01\sigma$  ( $p=0.99$ ) 均小于  $2\sigma$  的置信水平。因此，这些样本的种子因子分布服从正态分布。与 Harvey 的研究一致。

基于自举法，我们从低、高峰频种群中观测的种子因子分布分别构建了观测种子因子的大样本 (低峰频种群  $38 \times 10^4$  个，高峰频种群  $37 \times 10^4$  个)，分别从大样本中构建  $10^4$  个包含相同源数目的替代样本。使用替代样本，分别估算了不同种群中观测的种子因子分布的中位数 ( $\text{Obs}_{\text{median}}$ ) 及  $2\sigma$  置信区间，即：

$$\text{低峰频种群, } \text{Obs}_{\text{median}} = 4.20^{+0.21}_{-0.19} \quad (7)$$

$$\text{高峰频种群, } \text{Obs}_{\text{median}} = 4.43^{+0.24}_{-0.21} \quad (8)$$

图 3 中展示了两个种群种子因子分布直方图，并且标注了理论上期望的宽线区种子因子和尘埃环种子因子分布。从图 3 上，可以发现直方图峰值处靠近尘埃环的位置。

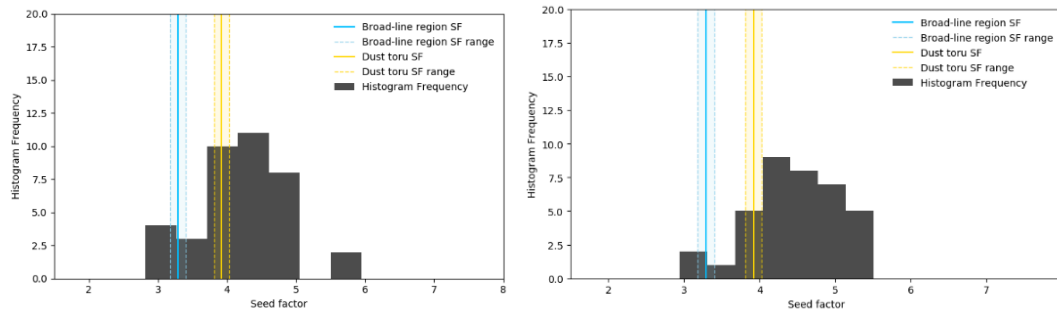


图3 两个种群的种子因子分布直方图。左图是低峰频种群 ( $12.10 \text{ Hz} < \log v_{\text{syn}} < 13.05 \text{ Hz}$ )，包含 38 个种子因子；右图是高峰频种群 ( $13.05 \text{ Hz} < \log v_{\text{syn}} < 14.11 \text{ Hz}$ )，包含 37 个种子因子。直方图用黑色区域展示。蓝色实线和虚线分别表示理论上的宽线区种子因子及范围。黄色实线和虚线分别表示理论上尘埃环的种子因子及范围。直方图的区间是由 matplotlib.pyplot.hist 自动选择的。从两幅直方图上，可以发现在直方图的峰值处靠近尘埃环的位置。

Fig.3 Histogram of two populations observed seed factor. The left panel is the low frequency peak populations ( $12.10 \text{ Hz} < \log v_{\text{syn}} < 13.05 \text{ Hz}$ ) containing the seed factor of 38 sources, and the right panel is the high frequency peak populations ( $13.05 \text{ Hz} < \log v_{\text{syn}} < 14.11 \text{ Hz}$ ) containing the seed factor of 37 sources. The histogram is plotted in black. The expected broad-line region seed factor and range are shown in blue, with solid and dashed lines, respectively. The expected dust torus seed factor and range are shown in yellow, with solid and dashed lines, respectively. The histogram was binned using the auto option for the matplotlib.pyplot.hist. As can be seen from this histogram, the seed factor distribution peaks close to the seed factor distribution of dust torus.

种子因子分布的直方图，没有包含估计的不确定性。为了包含估计的不确定性，基于自举法实现了低、高峰频种群的核密度估计 (kernel density estimation, KDE)。运用 Silverman's Rule<sup>[27]</sup>对 KDE 中的带宽自动进行了平滑处理<sup>[17]</sup>。图 4 展示了两个种群的核密度估计。在图 4 中，左图为低峰频种群，发现观测的种子因子分布与尘埃环的分布相交，表明软光子很可能由尘埃环主导；右图为高峰频种群，发现观测的种子因子分布与理论上的种子因子分布不相交，表明软光子可能不是由宽线区或尘埃环单一主导。

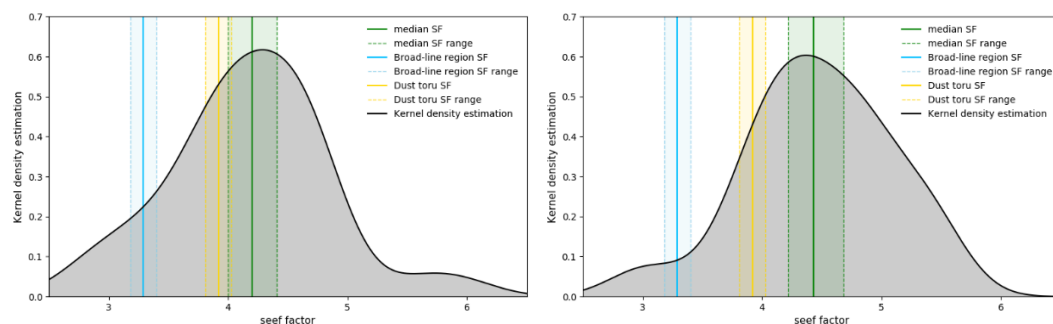


图4 两个种群的核密度估计。左图是低峰频种群 ( $12.10 \text{ Hz} < \log v_{\text{syn}} < 13.05 \text{ Hz}$ )，包含 38 个源种子因子，右图是高峰频种群 ( $13.05 \text{ Hz} < \log v_{\text{syn}} < 14.11 \text{ Hz}$ )，包含 37 个种子因子。黑色实线是核密度估计曲线，灰色区域是为了视觉辅助。蓝色实线和虚线分别表示期望上种子因子及范围；黄色实线和虚线分别表示期望上的尘埃环种子因子及范围；绿色实线和虚线分别表示观测上的种子因子中位数及  $2\sigma$  置信区间。外观上，核密度估计近似一个正态分布。在  $2\sigma$  的置信水平下，双侧柯尔莫戈洛夫检验显示均不能拒绝正态性假设，从左到右拒绝正态性假设的显著性分别为  $0.37\sigma$  ( $p=0.71$ ) 和  $0.01\sigma$  ( $p=0.99$ )。

Fig.4 Kernel density estimate of two populations. The left panel is the low frequency peak populations ( $12.10 \text{ Hz} < \log v_{\text{syn}} < 13.05 \text{ Hz}$ ) containing the seed factor of 38 sources, and the right panel is the high frequency peak populations ( $13.05 \text{ Hz} < \log v_{\text{syn}} < 14.11 \text{ Hz}$ ) containing the seed factor of 37 sources. The black solid line is the kernel density estimation, and the gray area is the visual aid. The expected broad-line region seed factor and range are shown in blue, with solid and dashed lines, respectively. The expected dust torus seed factor and range are shown in yellow, with solid and dashed lines, respectively. The median of observed seed factor and  $2\sigma$



confidence interval are shown in green, with solid and dashed lines, respectively. The KDE has the general appearance of a normal distribution. A two-sided Kolmogorov-Smirnov test indicates that normality cannot be rejected significantly (using a rejection significance threshold of  $2\sigma$ ), with rejection significance of  $0.37\sigma$  ( $p = 0.71$ ) and  $0.01\sigma$  ( $p = 0.99$ ) from left to right, respectively.

为了进一步检验观测的种子因子分布是与宽线区还是尘埃环位置对应，我们分别计算了低、高峰频种群中观测种子因子分布与理论上期望的种子因子分布之间的拒绝中位数相等的显著性。在标准差方面，对于低峰频种群，拒绝的显著性为：

$$\sigma(\text{Obs}_{\text{median}} - \text{BLR}_{\text{median}}) = 8.28\sigma \quad (9)$$

$$\sigma(\text{Obs}_{\text{median}} - \text{DT}_{\text{median}}) = 2.55\sigma \quad (10)$$

而在高峰频种群，拒绝的显著性为：

$$\sigma(\text{Obs}_{\text{median}} - \text{BLR}_{\text{median}}) = 10.39\sigma \quad (11)$$

$$\sigma(\text{Obs}_{\text{median}} - \text{DT}_{\text{median}}) = 4.66\sigma \quad (12)$$

因此，低峰频中观测的种子因子分布与理论上期望的 DT 种子因子分布的拒绝显著性最小，表明低峰频种群中软光子的起源应该很可能是由尘埃环主导的。而高峰频种群中虽然观测种子因子分布和 DT 种子因子分布的显著性比与 BLR 种子因子分布的拒绝显著性小，但是 KDE 显示出明显差异，表明软光子的起源对于尘埃环或许不是单一的位置，软光子可能有 BLR 和 DT 的贡献。

### 3 讨论与总结

我们研究发现无论是整个样本还是按数量均分的两个子样本，在  $\log(U_B(\nu F_\nu)_{\text{EC}}/U_{\text{BLR}}(\nu F_\nu)_{\text{syn}})$  和  $\log\delta$  之间的相关性方面，图 1 与图 2 没有表现出明显的差异。这就表明，轻子模型的框架下，FSRQs 中的 IC 机制很有可能由 EC 过程主导。图 1 中包含了 75 个 FSRQs，而图 2 左和右分别包含了 38 和 37 个 FSRQs，图上的数据分布两者均存在一定的弥散，这从某种程度上会削弱我们的结论。随着越来越多观测设备的加入，未来可以收集到更多的样本进一步的验证轻子模型框架下，高能辐射的主导过程。

种子因子的计算基于多波段 SEDs 的拟合，要求宽带辐射没有明显的光变现象<sup>[17]</sup>。我们使用 Harvey 提出运用自举法估算观测种子因子分布的方法去计算我们样本的种子因子。图 3 的直方图展示了观测的种子因子分布，该直方图没有包含估计的不确定性，图 4 的核密度估计包含了估计的不确定性。从图 3 可以发现，观测的种子因子分布集中在峰频位置，而图 4 的 KDE 曲线同样展示了相同的结果，并且展示了由我们的样本计算得到观测的种子因子分布与 Harvey 理论上期望的种子因子分布之间的差异。从图 4（左）可以发现，观测的种子因子分布在统计上与 DT 种子因子分布的范围相交，表明在低峰频的种群中软光子很可能由尘埃环主导。从图 4（右）可以发现，观测的种子因子分布超过了理论上期望的宽线区和尘埃环种子因子分布的范围，表明在高峰频种群中 DT 很可能不是主导软光子的单一位置，可能有 BLR 和 DT 共同的贡献。Harvey 的研究发现 FSRQs 的辐射区与 DT 的位置在统计上一致，表明软光子主要是 DT 的贡献。与 Harvey 的研究结果相比，我们的

样本在不同种群中显示出了不同的结果。图3的直方图分别包含38个和37个种子因子，因此统计上计算的种子因子偏少，会削弱我们的结论，希望未来进一步增加同时性样本，并且使用不同方法获得的观测量来作进一步分析验证。

本文从统计上研究了75个平谱射电类星体中软光子的起源。通过相关性分析，结果表明平谱射电类星体的IC机制很可能由EC过程主导。运用种子因子分布进一步检验了EC过程中软光子的来源，结果表明不同的种群在统计上有不同的结果。

致谢：我们感谢匿名老师提出宝贵的建议与帮助。感谢Harvey博士在种子因子方面的帮助。这项工作得到了国家自然科学基金天文联合基金（U1431123，10973034）的资助。

### 参考文献：

- [1] Urry C M . unified schemes for radio-loud active galactic nuclei[J]. publications of the astronomical society of the pacific, 1995.
- [2] Roger, D, Blandford, et al. Extended and Compact Extragalactic Radio Sources: Interpretation and Theory[J]. Physica Scripta, 1978.
- [3] Böttcher M. Modeling the emission processes in blazars[J]. Astrophysics and Space Science, 2007, 1(309): 95-104.
- [4] Bloom S D , Marscher A P . An Analysis of the Synchrotron Self-Compton Model for the Multi--Wave Band Spectra of Blazars[J]. Astrophysical Journal, 1996, 461(2Pt1):657.
- [5] Dermer C D , Schlickeiser R . Model for the High-Energy Emission from Blazars[J]. Astrophysical Journal, 1993, 416(2):458.
- [6] Sikora, Marek, Begelman, et al. Comptonization of diffuse ambient radiation by a relativistic jet: The source of gamma rays from blazars?[J]. ApJ, 1994, 421:153-153.
- [7] Castignani, G, De, et al. AGN torus emission for a homogeneous sample of bright flat-spectrum radio quasars[J]. Astronomy and astrophysics, 2015, 573(Pt.1).
- [8] Patio-Lvarez V M , Fernandes S , Chavushyan V , et al. Multiwavelength Photometric and Spectropolarimetric Analysis of the FSRQ 3C 279[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society(2):2037-2064.
- [9] Tavecchio F, Ghisellini G, Bonnoli G, et al. Constraining the location of the emitting region in Fermi blazars through rapid  $\gamma$ -ray variability[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, 2010, 405(1): L94-L98.
- [10] Ramakrishnan V, Hovatta T, Nieppola E, et al. Locating the  $\gamma$ -ray emission site in Fermi/LAT blazars from correlation analysis between 37 GHz radio and  $\gamma$ -ray light curves[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2015, 452(2): 1280-1294.
- [11] Albert J, Aliu E, Anderhub H, et al. Very-high-energy gamma rays from a distant quasar: how transparent is the universe?[J]. Science, 2008, 320(5884): 1752-1754.
- [12] Tavecchio F, Ghisellini G, Bonnoli G, et al. Constraining the location of the emitting region in Fermi blazars through rapid  $\gamma$ -ray variability[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, 2010, 405(1): L94-L98.
- [13] Aleksić J, Antonelli L A, Antoranz P, et al. MAGIC discovery of very high energy

- emission from the FSRQ PKS 1222+ 21[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2011, 730(1): L8.
- [14] 张浩,张娟,刘磊,郑为民,芮萍.空间 VLBI 数据记录格式 RDF 解析与数据解码[J].天文研究与技术,2020,17(02):163-170.
- [15] Marscher A P, Jorstad S G, Larionov V M, et al. Probing the inner jet of the quasar PKS 1510-089 with multi-waveband monitoring during strong gamma-ray activity[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2010, 710(2): L126.
- [16] Tan C, Xue R, Du L M, et al. The Physical Properties of Fermi-4LAC Flat Spectrum Radio Quasars[J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2020, 248(2): 27.
- [17] Harvey A L W, Georganopoulos M, Meyer E T. Powerful extragalactic jets dissipate their kinetic energy far from the central black hole[J]. Nature communications, 2020, 11(1): 1-5.
- [18] Abdollahi S, Acero F, Ackermann M, et al. Fermi Large Area Telescope Fourth Source Catalog[J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2020, 247(1): 33.
- [19] Hu W, Dai B Z, Zeng W, et al. The properties of jet in luminous blazars under the equipartition condition[J]. New Astronomy, 2017, 52: 82-95.
- [20] Xiong D R, Zhang X. The connections between bulk Lorentz factor, black hole mass and accretion in Fermi FSRQs[J]. Astrophysics and Space Science, 2014, 352(2): 809-818.
- [21] Maraschi L, Tavecchio F. The jet-disk connection and blazar unification[J]. The Astrophysical Journal, 2003, 593(2): 667.
- [22] Stratta G, Capalbi M, Giommi P, et al. The ASDC SED Builder Tool description and tutorial[J]. arXiv preprint arXiv:1103.0749, 2011.
- [23] 彭瑞,谢照华,薛瑞,王泽睿,罗丹,黄红艳,徐云冰,刘文广,易庭丰,谭灿,刘小鹏,杜雷鸣.费米耀变体峰值参量、康普顿主导、谱指数之间相关性的研究[J].天文研究与技术,2019,16(04):401-409.
- [24] Dermer C D, Sturmer S J, Schlickeiser R. Nonthermal Compton and synchrotron processes in the jets of active galactic nuclei[J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 1997, 109(1): 103.
- [25] Padovani P, Giommi P. The connection between x-ray-and radio-selected BL Lacertae objects[J]. The Astrophysical Journal, 1995, 444: 567-581.
- [26] Abdo A A, Ackermann M, Agudo I, et al. The spectral energy distribution of Fermi bright blazars[J]. The Astrophysical Journal, 2010, 716(1): 30.
- [27] Silverman B W. Density estimation for statistics and data analysis[M]. CRC press, 1986.

## Study on the origin of soft photons for the inverse Compton mechanism in flat-spectrum radio quasars

Liu Xiaopeng<sup>1</sup>, Wang Zerui<sup>2</sup>, Du Leiming<sup>1</sup>, Xin Zhao Hua<sup>1</sup>, Xu yunbing<sup>1</sup>, Deng Xuejiao<sup>1</sup>, Li Haifeng<sup>1</sup>

(1. School of physics and electronic information, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China. 2. School of Astronomy and

Space Science, Nanjing University, Jiangsu 210093, China.)

**Abstract:** To verify dominating processes in the inverse Compton mechanism and the origin of soft photons in the dominating processes. We collected multi-wavelength (quasi-)simultaneity data of 75 flat-spectrum radio quasars from the literature. We fitted the spectral energy distribution using logarithmic parabolic functions, then analyzed three correlations for the whole sample, the subsamples of two bins, respectively. The research results are summarized as follows. (1) We find significant correlations of  $\log(U_B(\nu F_\nu)_{EC}/U_{ext}(\nu F_\nu)_{syn})$  and  $\log\delta$  for the whole sample and subsamples of two bins, respectively. Our results show that the inverse Compton mechanism of the flat-spectrum radio quasar is preferentially dominant by the external Compton process under the leptonic model. (2) Based on the Bootstrap to calculate observed seed factor distribution, we apply this method to constrain the origin of soft photons of the dominant process of inverse Compton mechanism. The observed seed factor distribution suggests that soft photons are likely to be dominated by dust torus for populations with relatively low synchrotron peak frequencies. But, we cannot determine the origin of soft photons of the dominant process of inverse Compton mechanism for populations with relatively high synchrotron peak frequencies.

**Key words:** Jet-radiation mechanisms; Active-galaxies; Flat-spectrum radio quasar; Inverse Compton scattering